

ОСОБЛИВОСТІ РЕЗОНАНСНОГО ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ КРИЗЬ ТРИБАР'ЄРНУ КВАНТОВО-МЕХАНІЧНУ СТРУКТУРУ

Первак Є. О., магістрант; Андрієць С. Г., магістрантка;

Нелін Є. А., д.т.н., професор

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

У міру наближення характерного розміру твердотільної електронної структури до нанометрового діапазону цей розмір стає зіставним із розмірами атомів, молекул, постійними кристалічних ґрат та стає можливим використання квантово-механічних хвильових ефектів для створення новітніх пристроїв оброблення сигналів. Функціонування таких пристроїв базується, насамперед, на тунельному ефекті. За умови резонансного тунелювання електронів (РТЕ) коефіцієнт проходження (за модулем) $T=1$.

Квантово-механічна трибар'єрна структура (ТБС) з РТЕ є основою таких пристроїв терагерцового діапазону, як квантові каскадні лазери [1] та пристрої з фотоіндуційованими характеристиками [2].

Розглянемо особливості РТЕ крізь симетричну ТБС, а також характер зв'язку між її потенціальними ямами.

Традиційне моделювання нанорозмірних структур полягає в зшиванні рішень на межах різнорідних областей структури (наприклад, для ТБС [3]). У разі такого підходу, що став стандартним, необхідні громіздкі алгебраїчні перетворення, які для структур із багатьма межами виконують матричним методом. В імпедансній моделі [4] граничні умови враховано автоматично, що суттєво спрощує моделювання.

Рис. 1 ілюструє залежність потенціалу ТБС та її модель у вигляді неоднорідної лінії передачі. Для спрощення моделювання хвильові та входні імпеданси нормовано до імпедансу зовнішнього середовища. Потенціальні бар'єри та яма відповідають відрізкам лінії передачі. Моделювання виконується послідовним розрахунком входного імпедансу на межах відрізків, починаючи

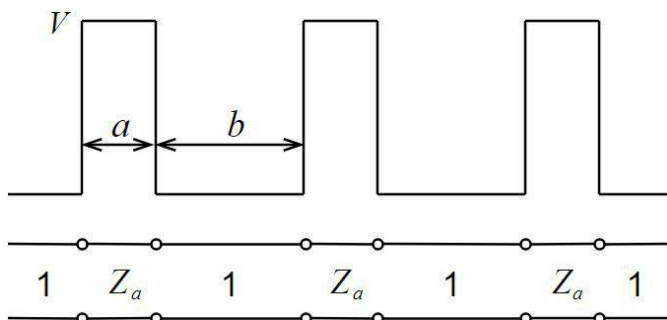


Рис. 1. Симетрична ТБС: V — висота бар'єра, 1 та Z_a — хвильові імпеданси зовнішнього середовища, потенціальної ями та бар'єра, a та b — товщина бар'єра та ширина ями.

з виходу структури. Попередній входний імпеданс є імпедансом навантаження наступного відрізка. Входний імпеданс структури дорівнює:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_i - Z_a \operatorname{th}(ik_a a)}{1 - Z_a^{-1} Z_i \operatorname{th}(ik_a a)},$$

де Z_i — входний імпеданс на правій межі першого бар'єра; $i=\sqrt{-1}$; k_a та m_a — хвильове

число та ефективна маса електрона в області бар'єра, $k_a = \sqrt{2m_a(E - V)} / \hbar$, E — енергія електрона, $\hbar = h / 2\pi$, h — постійна Планка.

На рис. 2 наведено залежності коефіцієнта проходження для двох ТБС — ТБС 1 та ТБС 2. Власним значенням (рівням) енергії ТБС відповідає РТЕ. Збільшення власних рівнів енергії ТБС 2 зумовлене зменшенням резонансних довжин хвиль у разі зменшення ширини ями. Зменшення резонансних довжин хвиль відповідає збільшенню резонансних частот і згідно з формулою Планка — збільшенню значень енергії.

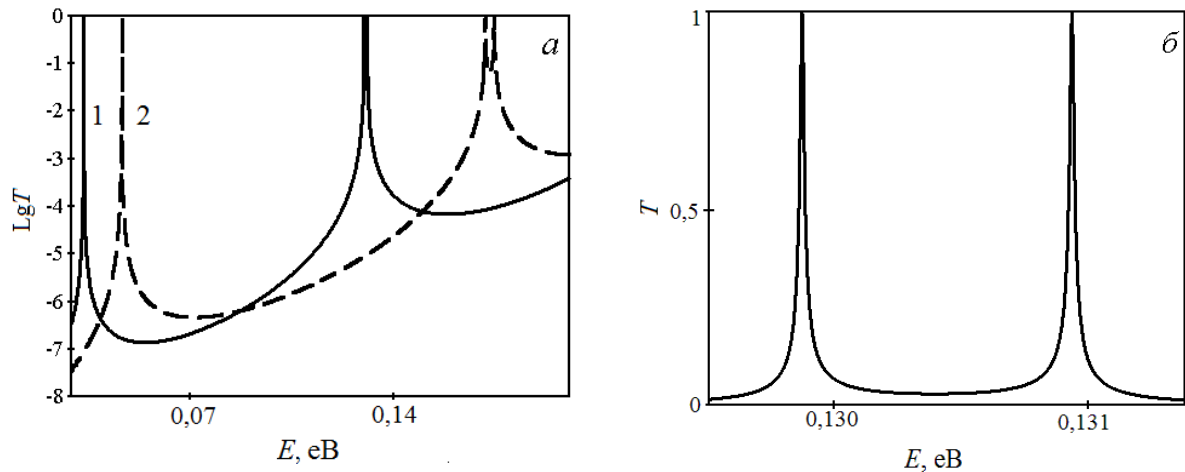


Рис. 2. Залежності коефіцієнта проходження: *a* та *б* — у широкому діапазоні для ТБС 1 (1) і ТБС 2 (2) та у вузькому для другої пари розщеплених рівнів ТБС 1, $V = 0,24$ еВ, $a = 2,5$ нм, $b = 2,5$ та 2 нм для ТБС 1 та ТБС 2 відповідно, $m_a = m_b = m_0$, m_b — ефективна маса електрона в областях ями та зовнішнього середовища, m_0 — маса електрона.

Унаслідок зв'язку між потенціальними ямами ТБС відбувається розщеплення власного рівня енергії поодинокі потенціальної ями. Розщеплення власного рівня енергії аналогічне розщепленню резонансної частоти коливального контуру для двох зв'язаних контурів. Зв'язок між потенціальними ямами ТБС залежить від коефіцієнта проходження потенціального бар'єра між ними. Зі зростанням енергії цей коефіцієнт збільшується, збільшується зв'язок і, відповідно, ступінь розщеплення рівнів.

Ступінь розщеплення визначається різницею власних значень енергії ΔE пари розщеплених рівнів. Для першої пари розщеплених рівнів ТБС 1 $\Delta E = 0,00009$ еВ, а для другої пари $\Delta E = 0,00107$ еВ. Ступінь розщеплення другої пари рівнів у 12 разів більше ніж першій парі.

Особливість квантово-механічних резонаторів полягає в їхній дуже високій добротності. Так, для лівого і правого рівнів енергії другої пари розщеплених рівнів ТБС 1 добротності дорівнюють 8483 і 8026 відповідно.

Як відомо, зв'язок між зв'язаними контурами може бути різним за характером реактивності. Встановимо характер зв'язку між потенціальними ямами ТБС. На рис. 3 наведено залежності складових вхідного імпедансу

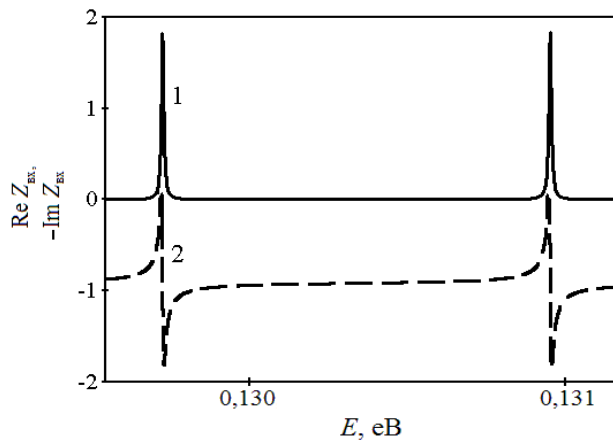


Рис. 3. Залежності активної (1) та реактивної (2) складових вхідного імпедансу ТБС.

для другої пари розщеплених рівнів енергії ТБС 1. Знак «-» реактивної складової зумовлений протилежністю знаків фази прямої хвилі в квантовій механіці й в радіотехніці. Зауважимо, що умова РТЕ відповідає узгодженню вхідного імпедансу ТБС з імпедансом зовнішнього середовища. У цьому випадку $\text{Re} Z_{\text{BK}} = 1$, а $\text{Im} Z_{\text{BK}} = 0$.

Як видно зв'язок між потенціальними ямами ТБС має ємнісний характер.

Перелік посилань

1. Consolino L. Spectral purity and tunability of terahertz quantum cascade laser sources based on intracavity difference-frequency generation / L. Consolino, S. Jung, A. Campa et al. // Sci. Adv.. — 2017. — Vol. 3, No. 9. — e1603317.
2. Ning W. G. The photoinduced voltage shift behavior in three-barrier resonant tunneling structure / W. G. Ning, J. Song, W. W. Wang, F. M. Guo // Opt. Quant. Electron. — 2016. — Vol. 48, No. 3. — <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0475-4>.
3. Ткач М. В., Сеті Ю. О. Теорія властивостей резонансно-тунельних наноструктур, як активних елементів квантових каскадних лазерів і детекторів / М. В. Ткач, Ю. О. Сеті // УФЖ. — 2013. — Т. 58, № 2. — С. 182–188.
4. Нелін Є. А. Порівняння традиційного та імпедансного методів моделювання квантово-розмірних структур / Є. А. Нелін, М. В. Водолазька // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2014. — № 56. — С. 129–136.

Анотація

Розглянуто особливості резонансного тунелювання електронів крізь квантово-механічну симетричну трибар'єрну структуру (ТБС). Наведено характеристики коефіцієнта проходження ТБС із різною шириною потенціальних ям. Встановлено, що зв'язок між потенціальними ямами ТБС має ємнісний характер.

Ключові слова: трибар'єрна структура, розщеплення власних рівнів енергії.

Аннотация

Рассмотрены особенности резонансного тунелирования электронов сквозь квантово-механическую симметричную трехбарьерную структуру (ТБС). Приведены характеристики коэффициента прохождения ТБС с различной шириной потенциальных ям. Установлено, что связь между потенциальными ямами ТБС имеет емкостной характер.

Ключевые слова: трехбарьерная структура, расщепление собственных уровней энергии.

Abstract

The features of electrons resonant tunneling through a quantum-mechanical symmetric three-barrier structure (TBS) are considered. Transmission coefficient characteristics of the TBS with different potential wells width are given. It is established that the coupling between TBS potential wells is capacitive in nature.

Keywords: three-barrier structure, energy levels splitt